

# プレパックドコンクリートにおけるグラウトの注入状況の予測方法

PREDICTIONS OF GROUTING PROCESS IN PREPACKED CONCRETE  
BY GREEN'S FUNCTION

岩崎訓明\*

By Noriaki IWASAKI

In the prepacked concrete practice, the process that the voids of preplaced coarse aggregate become filled up with the mortar depends on the shape and dimensions of the structure and the grouting conditions. A theoretical method for predicting this process was studied. From the hypothesis that the grout flows through the voids obeying the Darcy's law, the shape of the mortar surface was obtained as the solution of the equation of diffusion and expressed by Green's functions, which included the whole parameters above mentioned. The calculation results for a wall, four rectangular blocks, and a cylinder under different grouting conditions agreed well with the experimental values. An example of a large scale rectangular foundation was also calculated.

## 1. 序論

(1) プレパックドコンクリート工法の特長と問題点  
プレパックドコンクリート工法は、昭和20年代の終り頃、アメリカ合衆国から技術導入され、水中コンクリートとしての有用性から主として護岸、岸壁、防波堤、その他河川港湾関係の構造物に使用された。

それ以来、わが国独自の研究と施工経験の積重ねにより技術的な進歩が続いているが、特に昭和40年代初頭以降においては、本州四国連絡橋の海中基礎を対象とした大量急速施工法の研究が行われ、大規模な施工実験が数次にわたって実施された。その成果を踏まえて、児島一坂出ルート諸橋の橋脚が施工されたことは周知のことなりである。

このように、大規模な水中コンクリートとしての用途が本工法の最大の特長であるが、その実施にあたっては、グラウトの流動性、粗骨材の空隙特性、注入管の配置、注入順序、注入速度、等を適正にすることがきわめて重要であって、これらの諸条件が適切を欠いた場合には、グラウトの填充不全や水中分離が起こって、均質のコンクリートが得られなくなる、という大きな問題がある。

グラウトの充填状態を良好にするための1つの方法は注入速度を小さくすることであるが、その場合には当然の結果として施工能率が低下し、また時間経過によるグラウトの品質変化、気象・海象その他施工環境の悪化等によってグラウトの注入が中断された場合には、打継目の処理という非常に困難な作業を行わなければならなくなる。

このようなことから、大規模な工事に限らず、できるだけ大きな注入速度で施工できるように前記諸条件を選定することが必要であり、そのためにはグラウトの填充状態に及ぼす各種要因の影響を知ることがきわめて重要である。

さらに最近約10年間においては、グラウトに高性能減水剤を使用した高強度プレパックドコンクリートの研究が行われているが、この種のグラウトは、通常のグラウトと同等の流動性にすると、細骨材の分離、沈殿を起こすので、これを防ぐために流動性の小さいグラウトを用いてゆっくり注入しなければならないのが現状であり、注入条件の選定は通常のグラウトを用いる場合よりも一層重要な問題である。

以上のように、施工条件とグラウトの填充状態との関係を明らかにすることは、プレパックドコンクリートの施工の合理化、能率化のため、また、高強度化のために

\* 正会員 工博 東洋大学教授 工学部土木工学科  
(〒350 川越市鯨井中野台2100)

貢献するところが大きいものと考えられる。

### (2) 粗骨材中のグラウトの流動に関する既往の研究

この問題に関する基礎的な研究は運輸省港湾技術研究所において木庭ら<sup>1)</sup>によって行われた。

木庭らの用いた実験装置はFig. 1に示すものであつて、一定量のグラウトを流出管から流下させ、粗骨材層が流出管とグラウト容器との間に存在する場合と存在しない場合の流出所要時間の差を解析することによって、粗骨材層中におけるグラウトの流動がDarcyの法則に従うことを明らかにし、透水係数に相当する浸透係数の測定方法を提案した。また、浸透係数と粗骨材の有効直徑および間隙比との関係についても実験を行い、グラウトのPロートフロー値が15秒の場合について実験式を得ている。

粗骨材を充填した型枠内に注入管を通してグラウトを注入する実験は、港湾技術研究所<sup>1), 2)</sup>、日本鉄道建設公団<sup>3), 4)</sup>、本州四国連絡橋公団<sup>5)</sup>、清水建設技術研究所<sup>6)</sup>、等において行われた。

これらの諸実験では、グラウトの表面勾配と材料分離状況を観察しており、結果として、注入管1本当たりの注入面積が4m<sup>2</sup>程度で、粗骨材の有効直径が24mm、空隙率が43%の場合には注入速度は17l/min以下が適当であること<sup>2)</sup>、80~150mmの大寸法碎石を粗骨材として用いれば、注入管1本当たりの注入速度および受持面積をそれぞれ400l/min、100m<sup>2</sup>程度にすることが可能であること<sup>5)</sup>、粗骨材の最小寸法が40~60mm程度の場合には注入速度は150l/min程度以下が適当であること<sup>6)</sup>、などが明らかにされている。

このように、グラウトの注入条件についていくつかの重要な実験研究があるが、その数は少なく、また、これらをまとめて対比し、注入条件とグラウトの表面勾配との関係を検討した結果<sup>7)</sup>においても、粗骨材粒径が小さいほど、グラウトの流動性が小さいほど、そして注入速度が大きいほど、グラウトの流動勾配が大きくなる、というきわめて概略的な傾向が確認されるにとどまっている。

したがって、型枠の形状と寸法、粗骨材の粒径と空隙率、注入管の配置、グラウトの流動性、水中と陸上の別、注入速度、注入管の配置、グラウトの流動性、水中と陸上の別、注入継続時間など、グラウトの填充状況に関係する多数の要因に対応する資料を実験によって整えることはほとんど不可能に近いと考えられる。

### (3) 本研究の概要

グラウトの注入状態は前述のような数多くの要因によって支配されているが、これらの諸要因のはほとんどすべてを含んだ一般式によってグラウトの注入状況を推定することが可能になれば、良好な填充状態が得られるよ

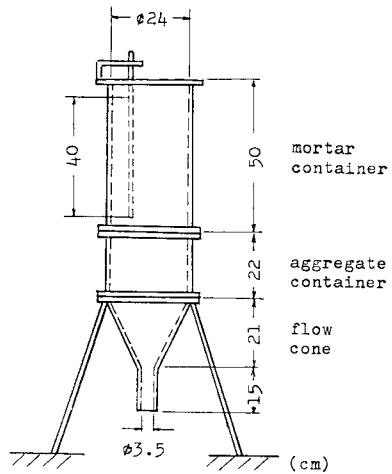


Fig. 1 Permeability test apparatus.

うにグラウトの表面勾配を設定して、それを満足するような施工条件を理論的に選定することが可能となり、注入計画ばかりでなく、施工計画全般を合理的に立案することができるようになる。本論文はこのような目的をもって行っている研究のうちの最も基本的な部分を報告するものである。

従来、注入時における粗骨材層中のグラウトの流動は三次元の非定常問題となり、理論的な取扱いはきわめて困難であるとされてきたが、著者は、粗骨材空隙中におけるグラウトの流動がDarcyの法則に従うことに着目し、さらに、グラウトの高さを圧力に変換することによって型枠内の任意の位置、任意の時刻におけるグラウト面の高さを二次元の拡散方程式の解として求めることができた。その結果、グラウト表面の形状はGreen関数で与えられることとなり、注入管の本数、配置、注入速度、等の施工条件が注入完了までの間に変化する場合でも、Green関数の特性を利用することによってグラウトの注入状態を計算で知ることが可能となった。

以下、グラウトの填充状態を推定するための基礎理論および一般式、具体的な計算方法、実験ならびに既往の実験結果による理論の妥当性の検証、実構造物規模での計算例、等について述べる。

## 2. 基礎理論

### (1) 基本法則

一般に多孔性媒質を通る流体の流れに対しては、Darcyの法則が数学モデルとして用いられるが、注入モルタルの場合には降伏値がゼロではないから、圧力勾配がある値より小さくなると流れは停止する。すなわち、グラウトの流れは厳密にはDarcyの法則に従うとはいえない。しかし、粗骨材空隙中に注入されたグラウトは、

注入中止後において表面の平均化が起こること<sup>21</sup>、回転粘度計による実験結果<sup>8)</sup>によれば、せん断ひずみ速度が小さくなると、グラウトはビンガム体としての降伏値より小さいせん断応力でも流動すること、および、前述した本庭らの研究結果から考えて、流動状態下においては近似的に Darcy の法則が適用できるものと思われる。

## (2) 基礎方程式

粗骨材充填層内に、厚さ  $l$ 、断面積  $A$  の板状部分を考えると、両側の圧力水頭の差が  $\Delta h$  であるとき、定常状態においては、 $A$  を通って時間  $t$  の間に流れるグラウトの量  $Q$  は、浸透係数  $k$  として次式で表わされる。

$$Q = -k \frac{\Delta h}{l} A t = -\frac{k}{\rho} \frac{\Delta p}{l} A t \quad (1)$$

ここに、 $\Delta p$ ：圧力差、 $\rho$ ：グラウトの単位体積重量

非定常状態の場合には、グラウトの流れに垂直な面積  $dA$  を通して時間  $dt$  の間に流れるグラウトの量を  $dQ$  とすれば

$$dQ = -k \frac{\partial h}{\partial s} dA dt = -\frac{k}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} dA dt$$

である。 $\partial p / \partial s$  は流線に沿っての圧力勾配である。

時刻  $t$  における点 P での圧力を  $p(x, y, z, t)$  とし、P を頂点として 3 辺が  $dx, dy, dz$  である直方体を考えると、時間  $t$  の間に直方体の  $zx$  面に平行な左側の面から流入するグラウト量、および右側の面から流出するグラウト量は、それぞれ

$$dq_y = -\frac{k}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} (dx dz) dt$$

$$dq_y + \frac{\partial}{\partial y} (dq_y) dy = dq_y - \frac{k}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} (dx dz) dt \cdot dy$$

であるから、直方体に蓄えられるグラウト量  $dQ_y$  は

$$dQ_y = \frac{k}{\rho} \frac{\partial p^2}{\partial y^2} (dx dy dz) dt$$

である。

$xy$  面、 $yz$  面に平行な方向についても同様に

$$dQ_z = \frac{k}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} (dx dy dz) dt$$

$$dQ_x = \frac{k}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} (dx dy dz) dt$$

であるから

$$dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z$$

$$= \frac{k}{\rho} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) dx dy dz dt$$

ここで粗骨材充填層の微小部分  $dx dy dz$  にグラウトが  $dq$  だけ貯留されたときの圧力上昇を考え、圧力を単位量だけ高めるのに要する単位体積当たりのグラウト量を  $q_0$  とすると、 $dQ$  による圧力上昇  $dp$  は

$$dp = \frac{dQ}{q_0 (dx dy dz)}$$

であるから

$$q_0 dx dy dz dp = \frac{k}{\rho} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) dx dy dz dt$$

すなわち

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{q_0 \rho} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) = a \Delta p \quad (2)$$

が得られる。

$$\text{ここに, } a = k / q_0 \rho \quad (3)$$

であり、 $\Delta$  は  $\partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$  を表わす。

## (3) グラウトの表面形状を与える一般式

### a) 圧力からグラウト表面高さへの変換

方程式  $\partial p / \partial t = a \Delta p$  の解は

$$p = \iiint G(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t, \xi'_1, \xi'_2, \xi'_3) dV' \quad (4)$$

$$\times f(\xi'_1, \xi'_2, \xi'_3) dV' \quad (4)$$

で与えられる。

ここに、 $G$  は Green 関数で、座標系と境界条件によって定まり、 $f$  は初期条件、すなわち  $t=0$  における圧力分布である。

いま、二次元の場合を考え、直交座標  $x, y$  をとることとすると、点  $P(x, y)$  における圧力  $p$  は

$$p = \iint G(x, y, t, x', y') \cdot f(x', y') dx' dy'$$

であるが、ここで、点  $P$  において単位底面積をもち、空隙率が  $\varepsilon$  である柱状の粗骨材層を考え、この柱状体に単位体積重量が  $\rho$  のグラウトを  $q_0$  だけ注入したとすればグラウトの高さは  $h_0 = q_0 / \varepsilon$  となり、このときの P の圧力は 1 であるから  $\rho h_0 = \rho q_0 / \varepsilon = 1$ 、すなわち

$$q_0 = \frac{\varepsilon}{\rho} \quad (5)$$

となる。また、グラウトの高さが  $h$  のときの点 P における圧力  $p$  は

$$p = \rho h \quad (6)$$

であるから、

$$h = \frac{p}{\rho} = \left( \frac{q_0}{\varepsilon} \right) p = \frac{q_0}{\varepsilon} \iint G \cdot f dx' dy' \quad (7)$$

が得られる。なお、この式における初期条件  $f$  は、 $t=0$  におけるグラウトの表面形状が与えられれば、式(6)を用いて定めることができる。

### b) 注入時におけるグラウトの表面形状

$p$  は熱伝導方程式と同形の拡散方程式(2)を満たすから、熱伝導に関する理論を適用することができる。そのためには、グラウトの注入を熱の発生と考え、温度を圧力に、また、諸定数を熱伝導率  $\lambda \rightarrow k / \rho$ 、 $c\gamma \rightarrow q_0$ 、 $a = k / \varepsilon$  と変換すればよい( $c$  は比熱、 $\gamma$  は比重)。

水中注入の場合には、 $\rho \rightarrow \rho - 1$  となるが、その場合でも、 $q_0 = \varepsilon / (\rho - 1)$ 、 $a = k / q_0 (\rho - 1) = k / \varepsilon$ 、 $h = p / (\rho - 1) = (q_0 / \varepsilon) p$ 、となるから、 $k$  として水中注入の場合の値

を用いれば、計算式は空気中注入の場合と全く同一である。

熱伝導理論によれば、初期温度  $0^\circ\text{C}$  の物体内で時刻  $\tau$ において単位時間に発生する熱量が  $Q(\tau)$  であるときの物体の温度変化は、二次元の場合次式で表わされる。

$$\theta(x, y, t) = \frac{1}{c\gamma} \int_0^t G_\tau(x, y, \tau, x', y') \cdot Q(\tau) d\tau$$

ここに、 $(x', y')$  は熱源の座標、 $t$  は加熱時間 したがって、前述の変換を行うと

$$p(x, y, t) = \frac{1}{q_0} \int_0^t G_\tau \cdot Q(\tau) d\tau$$

$$h_a = \left( \frac{q_0}{\epsilon} \right) p = \frac{1}{\epsilon} \int_0^t G_\tau Q(\tau) d\tau \quad \dots \dots \dots (8)$$

となる。

複数の注入管を用いる場合には、解の加算性により

$$h_a = \frac{1}{\epsilon} \sum_{i=1}^{N_p} \int_0^t G_\tau(x, y, \tau, x_{pi}, y_{pi}) \cdot Q_i(\tau) d\tau \quad \dots \dots \dots (9)$$

である。

ここに、 $N_p$  は注入管の本数、 $x_{pi}$ 、 $y_{pi}$  および  $Q_i$  は  $i$  番目の注入管の座標と注入速度である。

### c) 注入中断後におけるグラウトの表面形状

グラウトの注入を中断した後におけるグラウトの表面形状の変化を求めるには、中断時の表面形状  $h_1(x', y')$  を求め中断時を時間の原点にとって式(9)によってそれ以後のグラウトの高さ分布を計算すればよい。

中断時刻を  $T$  とすると、中断時の表面形状は

$$h_1(x', y') = \frac{1}{\epsilon} \sum_{i=1}^{N_p} \int_0^T G_\tau(x', y', \tau, x_{pi}, y_{pi}) \times Q_i(\tau) d\tau \quad \dots \dots \dots (10)$$

であり、中断後の表面形状は

$$h_1(x', y') = \frac{1}{\epsilon} f(x', y') \quad \dots \dots \dots (11)$$

を考慮して

$$h_r(x, y, t) = \iint h_1(x', y') \times G(x, y, t - T, x', y') dx' dy' \quad \dots \dots \dots (12)$$

である。

式(12)は、型枠が円筒形の場合などでは積分が可能であるが、一般には、すべての点における  $h_1$  の値がわかるから、数値積分によって求めることになる。

### d) 注入条件が変化する場合の表面形状

注入条件が変化した場合、たとえばいったん注入を中断した後ある時間を経てから再び注入を再開するような場合には、解の加算性を利用して次のようにして  $h$  が求まる。注入再開時の注入管本数、位置、注入速度、などの条件は第1回目の注入時と同じである必要はないが、簡単のために注入管は1本とし、1回目の注入終了時を  $T_1$ 、再開時を  $T_2$  とすると、中断時においては

$$h_1(x', y') = \frac{1}{\epsilon} \int_0^{T_1} G_\tau(x', y', \tau, x_{pi}, y_{pi}) \cdot Q_1(\tau) d\tau \quad \dots \dots \dots (13)$$

中断中の表面形状変化は式(12)により

$$h_r(x, y, t) = \iint h_1(x', y') \times G(x, y, t - T_1, x', y') dx' dy'$$

再注入による表面形状変化は

$$h_s(x, y, t) = \frac{1}{\epsilon} \int_{T_2}^{t-T_2} G_\tau(x, y, \tau, x_{pi}, y_{pi}) \cdot Q_2(\tau) d\tau \quad \dots \dots \dots (14)$$

$$h(x, y, t) = h_r + h_s \quad \dots \dots \dots (15)$$

である。

注入条件が繰り返し変化する場合には、このような計算を反復すればよいかから、注入条件がどのように変化した場合でも、任意の時刻におけるグラウトの填充状況を知ることができる。

## 3. グラウトの注入状態の計算式

### (1) 型枠が壁状の場合

型枠が長さ  $L$ 、幅  $B$  の壁状の場合、Fig. 2 のように型枠の端面を原点として  $x$  軸をとると、 $x=0$ 、 $x=L$  においてグラウトの流出がないから、境界条件は

$$\left[ \frac{\partial h_a}{\partial x} \right]_{x=0} = \left[ \frac{\partial h_a}{\partial x} \right]_{x=L} = 0$$

であり、その場合の Green 関数は次式で与えられる。

$$G_x = \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left[ -\left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 a\tau \right] \times \cos \frac{n\pi x}{L} \cos \frac{n\pi x'}{L} \quad \dots \dots \dots (16)$$

したがって、注入中においては、式(9)により

$$h_a(x, t) = \frac{1}{\epsilon} \sum_{i=1}^{N_p} \int_0^t \frac{q_i(\tau)}{L} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left[ -\left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 a\tau \right] \cos \frac{n\pi x}{L} \cos \frac{n\pi x_{pi}}{L} \right] d\tau$$

ここで、 $q_i(\tau)$  は単位幅当たりの注入速度であって、注入管の注入速度を  $Q_i$  とすると、 $q_i(\tau) = Q_i/B$  である。 $Q_i$  は  $0 \sim t$  の間で変化しないものとして積分すると

$$h_a = \frac{1}{\epsilon B L} \sum_{i=1}^{N_p} Q_i \left[ t + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{a} \left( \frac{l}{n\pi} \right)^2 \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{an^2\pi^2}{L^2} t \right] \right\} \cos \frac{n\pi x}{L} \cos \frac{n\pi x_{pi}}{L} \right]$$

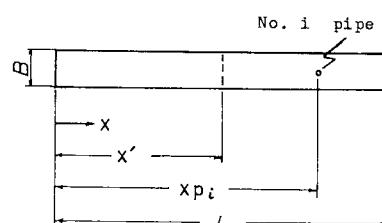


Fig. 2 Wall.

となる。

同様に、注入中断後 ( $t > T_1$ )においては

$$h_r = \int_0^L h_1(x') \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left\{ -a \left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 (t - T_1) \right\} \cos \frac{n\pi x}{L} \cos \frac{n\pi x'}{L} \right] dx'$$

ここに、 $T_1$ ：注入中断時刻、 $h_1(x')$ ： $t = T_1$ における表面形状

### (2) 型枠が長方形の場合

型枠が長さ  $L$ 、幅  $B$  の長方形の場合、Fig. 3 のように型枠の隅角点を原点とする  $x$ 、 $y$  軸をとる。

$x=0$ 、 $x=L$ ； $y=0$ 、 $y=B$ においてグラウトの流出がないから、この場合の Green 関数は可積性により  $G_{xy} = G_x \cdot G_y$  である。ここで  $G_y$  は式 (16) における  $x$  を  $y$  に、 $x'$  を  $y'$  に、 $L$  を  $B$  に、 $n$  を  $m$  に置き換えた式である。したがって、式 (9) は

$$h_q(x, y, t) = \frac{1}{\epsilon} \sum_{i=1}^{N_p} Q_i \int_0^t G_{xy} d\tau$$

となるが、積分を実行すると

$$h_q(x, y, t) = \frac{1}{\epsilon B L} \sum_{i=1}^{N_p} Q_i (t + 2S_x + 2S_y + 4S_{xy}) \dots (17)$$

ただし、

$$S_x = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{a} \left( \frac{L}{n\pi} \right)^2 \left\{ 1 - \exp \left( -\frac{an^2\pi^2}{L^2} t \right) \right\}$$

$$\times \cos \frac{n\pi x}{L} \cos \frac{n\pi x_{pi}}{L}$$

$$S_y = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{a} \left( \frac{B}{m\pi} \right)^2 \left\{ 1 - \exp \left( -\frac{am^2\pi^2}{B^2} t \right) \right\}$$

$$\times \cos \frac{m\pi y}{B} \cos \frac{m\pi y_{pi}}{B}$$

$$S_{xy} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{a \left[ \left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 + \left( \frac{m\pi}{B} \right)^2 \right]} \left[ 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{an^2\pi^2}{L^2} + \frac{am^2\pi^2}{B^2} \right) t \right\} \right] \cos \frac{n\pi x}{L}$$

$$\times \cos \frac{n\pi x_{pi}}{L} \cos \frac{m\pi y}{B} \cos \frac{m\pi y_{pi}}{B}$$

である。

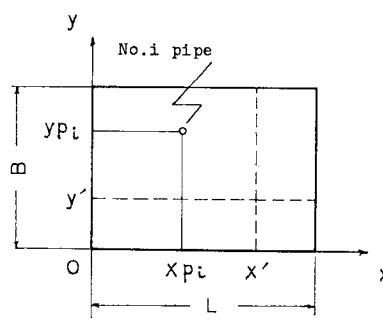


Fig. 3 Rectangular block.

また、注入中断後 ( $t > T_1$ ) の場合には

$$h_r(x, y, t) = \iint h_1(x', y') (1 + 2 \sum_x) \times (1 + 2 \sum_y) dx' dy' \dots (18)$$

ただし、 $h_1(x', y')$  は式 (17) で  $t = T_1$ 、

$$\sum_x = \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left\{ -\frac{an^2\pi^2}{L^2} (t - T_1) \right\}$$

$$\times \cos \frac{n\pi x}{L} \cos \frac{n\pi x'}{L}$$

$$\sum_y = \sum_{m=1}^{\infty} \exp \left\{ -\frac{am^2\pi^2}{B^2} (t - T_1) \right\}$$

$$\times \cos \frac{m\pi y}{B} \cos \frac{m\pi y'}{B}$$

再注入を行う場合には、再開時刻を  $T_2$  とすると

$$h_s(x, y, t) = h_q(x, y, t - T_2)$$

であるから

$$h(x, y, t) = h_q(x, y, t - T_2) + h_r(x, y, t) \dots (19)$$

である。

### (3) 円筒形型枠の場合

型枠が半径  $R$  の円筒形の場合、注入管は円筒の中心に設置するものとする。

円筒の中心を原点として円筒座標をとると、 $r = R$ においてはグラウトの流出がないから、Green 関数は

$$G_r = \frac{1}{\pi R^2} \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-a\mu_n^2 r) \times \frac{J_0(\mu_n r) J_0(\mu_n r')}{J_0^2(\mu_n R)} \right\}$$

で与えられるので、式 (8) は結局

$$h_q(r, t) = \frac{Q}{\pi R^2 \epsilon} (t + \sum_1) \dots (20)$$

ただし

$$\sum_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_n r)}{a \mu_n^2 J_0^2(\mu_n R)} [1 - \exp(-a\mu_n^2 t)]$$

ここに、 $\mu_n$  は  $J_1(\mu_n R) = 0$  の  $n$  番目の正根

中断時 ( $t = T_1$ ) においては

$$h_1(r, T_1) = h_q(r, T_1) \dots (21)$$

となる。

さらに中断後においては

$$h_r(r, t) = \int_0^r h_1(r') G_r \cdot (2\pi r' dr')$$

であるから、この式の  $h_1(r')$  に式 (21) を代入し、

Bessel 関数の性質および  $J_1(\mu_n R) = 0$  を用いて積分を実行すると、最終的には次式が得られる。

$$h_r(r, t) = \frac{Q}{\pi R^2 \epsilon} (T_1 + \sum_2 \sum_3) \dots (22)$$

ただし

$$\sum_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_n r)}{J_0^2(\mu_n R)} \exp[-a\mu_n^2(t - T_1)]$$

$$\sum_3 = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{a\mu_m^2} |1 - \exp(-a\mu_m^2 T_i)|$$

すなわち、この場合には数値積分によらずにグラウトの表面形状を計算することができる。

再注入時( $t > T_i$ )では

$$h_s = h_q(r, t - T_i)$$

であるから

$$h(r, t) = h_q(r, t - T_i) + h_r(r, t) \dots \dots \dots (23)$$

となる。

#### 4. 実験による検証

##### (1) 実験方法

注入実験に用いた型枠は  $50 \times 20 \text{ cm}$ 、高さ  $35 \text{ cm}$  の直方形で、前面を透明板として  $5 \text{ cm}$  の方眼目盛を付けたものである。

粗骨材は川砂利で粒径範囲、グラウトを透過させたときの浸透係数、および空隙率は Table 1 のとおりである。なお、浸透係数は Fig. 1 の装置を用いて測定した 3 回の平均値である。グラウトは、C:F:S:W=1:0:1:0.552、ポゾリス No. 8=C×0.5 %、フロー 15.1 秒のもので、注入は気中とし、所定の位置に底面から下端を約 3 cm 離して建て込んだ  $20 \text{ mm}$  鋼管を通して重力で行った。その際、注入速度を一定に保つことは困難であったので、注入管を接続したホッパ内のグラウト面の高さを一定に保つこととし、注入速度は写真撮影したグラウトの填充状態から計算した。

##### (2) 填充状況の計算方法

計算には、二次元の場合の式(17)を用い、 $x$  方向を 25 等分、 $y$  方向を 10 等分して、合計 286 の格子点の  $h$  を求めた。

粗骨材の空隙率と浸透係数は実測値とし、注入速度は注入量と注入時間から求めた平均注入速度をいくぶん割増した値とした。これは、観測された壁面のグラウト高さより中央部では高くなっていることを考慮したものである。

計算式は無限級数であるが、加算する項数  $N$  は以下のようない由から 3とした。すなわち、式(17)による計算結果は注入管位置にピークをもつ曲面となり、 $N$  が小さいときはピークが低く、 $N$  が大きくなると高くなる傾向にあるが、注入点以外の点の計算値は  $N$  を小さくとっても誤差が少ない(Fig. 4に、 $N=3, 10, 100$  の場合の結果を示す)ことと、平面上の一点に熱を与える場合とは異なり、グラウトの注入点は实际上かなりの面積をもっているため、グラウト表面の頂点は  $N=\infty$  とした場合より低くなり、 $N=3$ とした方が実験結果と計算値がよく一致したからである。これは、計算時間が短縮される点でも有利となる。

Table 1 Properties of aggregate.

Aggr No.	Grading (mm)	Voids (%)	Permeability (cm/s)
A1	15-20	36.17	4.12
A2	20-30	39.06	6.07
A3	30-60	40.56	10.49

#### (3) 実験値と理論値の比較

実験は粗骨材の粒径、注入管の本数を変えて 7 ケース行ったが、ここではそのうちの 3 ケースについて実験結果と計算結果を Fig. 4～Fig. 6 に示した。

注入諸条件は 5.において述べる既往の実験の注入条件と併せて Table 2 にまとめて示してあるが、case 1～case 3 では粗骨材粒径を変化させ、また case 3 (Fig. 6) では注入管を 2 本用いている。

なお、Fig. 7 は case 3 の場合で  $t=5 \text{ s}$  における注入状態全体を透視図で表したものである。

#### 5. 既往の実験結果による検証

##### (1) 壁状型枠の場合

20 cm × 2 m、高さ 80 cm の壁状型枠を用いた水中注入実験が港湾技術研究所において行われている<sup>1)</sup>。

この実験では、浸透係数  $k$  が測定されているので、実験結果と本研究における計算結果を直接照合することができた。その一例を Fig. 8 に示す。注入条件は後掲の Table 2 に case 4 として示してあるが、注入速度については case 1～case 3 において行ったのと同じ方法で求めている。

計算式は一次元の式でもよいが、より一般的な二次元の式(17)を用いた。級数の項数  $N$  は前述のとおり 3 とし、浸透係数と空隙率は実測値を用いた。

Fig. 8 は時間経過に伴う壁面におけるグラウト表面の上昇状況を示したもので、観測結果(点線)と理論値(実線)はよく一致しており、本理論の適合性とともに、水中注入の場合でも浸透係数として空気中で測定した値を用いてよいことを示している。

ただし、注入の初期の段階では、計算値よりも実際のグラウトの広がりが小さくなっていることから、この段階では水の影響を受けていたことが推定される。

##### (2) 大型の正方形型枠および円筒形型枠の場合

大規模な注入実験が鉄道建設公団によって行われ、検知管による測定と硬化後におけるはり出しによってグラウトの注入状況の経時変化が観測されているので、その 2 例についての検証結果を Fig. 9, 10 に示す。

この実験では、碎石の粒径範囲、フロー値、平均注入速度、各パッチの注入速度、注入パッチ数および経過時間と注入部分の形状変化との関係、等が記録されている

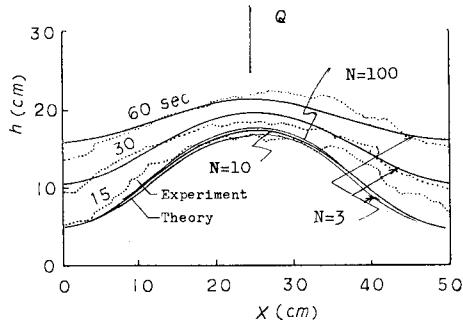


Fig. 4 Comparison of the theory with experimental results.

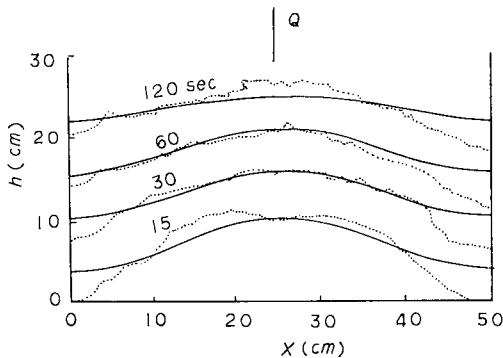


Fig. 5 Rectangular form of 20 cm by 50 cm.

ので、これらの資料に基づき、計算に必要な空隙率、浸透係数および注入速度を次のように推定した。

空隙率——注入2時間における注入部分の体積でモルタル注入量を割って求めた。実験と同一粒径の砕石で粒径分布を3通りに変え、密詰め、ゆる詰めで空隙率を実測して、計算値がこの範囲にあることを確かめた。

浸透係数——砕石の粒径が過大で測定が困難だったので、粒径30~60 mmにおける浸透係数を測定し、その値(6.8 cm/s)をもとにcase 5では9, 12, 15 cm/sの3通りとした。

注入速度——case 5では平均注入速度を用いた。

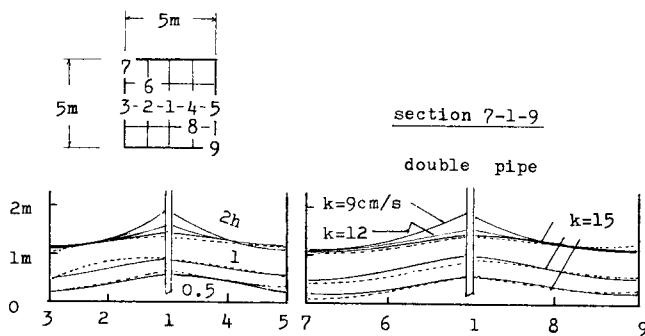


Fig. 9 5 m square form.

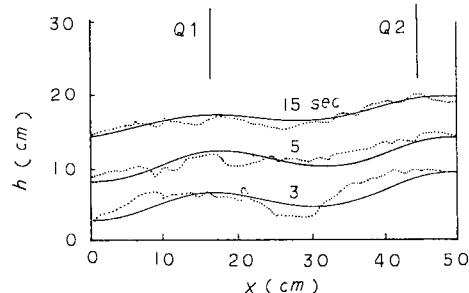


Fig. 6 Theoretical and experimental results for grouting with two pipes.

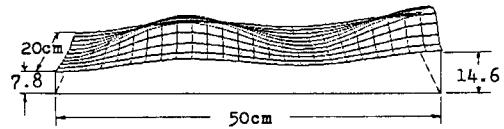


Fig. 7 Perspective drawing of mortar surface calculated for case No. 3 at 5 s.

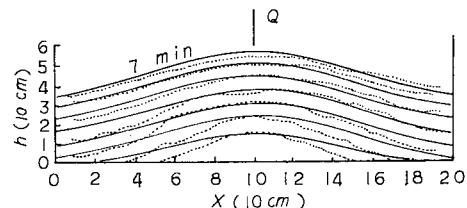


Fig. 8 Results for the wall-shaped form grouted at a constant rate 11.5 l/min.

case 6では、0~1 hと1~2 hにおける注入速度に差があったので、その間の各バッチの注入速度の平均値を求め、 $Q_1=60.4$ ,  $Q_2=51.7 \text{ l}/\text{min}$ とした。

計算は、case 5の場合式(17)を用いて各辺を20等分した441点の $h_q$ を求めた。case 6では式(20), (22), (23)を用いた。なお、Nはどちらの場合にも3とした。

これら2例は、計算に用いた定数の一部が推定値であるが、理論値と実験結果は比較的よく一致している。し

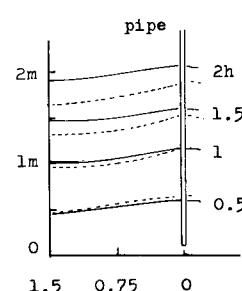


Fig. 10 Cylindrical form; grouting rate changed at 1 h.

Table 2 Grouting conditions.

Case No.	Fig No.	Dimensions	Coarse aggregate	Location of pipes	Grout time	Grouting rate Q1	Q2	Remarks
1	4	L=50cm B=20cm	A1	Center	15s 30 60	16.8 l/min 11.7 6.9	- - -	Rectangular
2	5	L=50cm B=20cm	A2	Center	15 30 60 120	11.9 10.8 8.1 4.6	- - - -	
3	6	L=50cm B=20cm	A3	xpl=16.7cm xp2=44.4cm yp1=yp2=10	3 5 15	37.7 38.8 17.2	30.1 25.9 11.5	
4	8	L=2m B=0.2m	20-30mm V=43.3% k=8.96	Center	1min 5 7	11.5	-	Wall shaped Underwater
5	9	L=5m B=5m	40-80mm V=48.1% k=9,12,15	Center	0.5h 1 2	120	-	Square Underwater
6	10	R=1.5m	40-150mm V=48.5% k=15cm/s	Center	0-1 1-2	60.4 - 51.7	- - -	Grouting rate chan- ged at 1 h

たがって、グラウトの流動性と注入速度の変動、および粗骨材空隙の不均一、等による局部的な乱れは当然存在するにしても、全体として順調にグラウトが流動している場合に対する本理論はよく適合すると考えられる。

## 6. 施工面積が広大な場合についての計算例

ドックの底版などのように施工面積が広い場合には、全面積にわたって同時注入を行うことが困難であったり不経済になつたりするため、一端から他端へ向かって順次注入箇所を移していく方式が採用される。鹿島港のドライドックの底版は、この方式で施工された最大規模のものであって、注入管は約  $40\text{ m} \times 66\text{ m}$  の施工面に対して、短辺方向に  $1.5\text{ m}$  間隔、長辺方向に  $1.25\text{ m}$  間隔の千鳥形配置とし、第1列に用いた注入管を、第3、5、……列へ順序移動して全体を連続施工している。

このように施工面積が広い場合には注入管の間隔を大きくする方が経済的には有利になるが、ここではこの例と同じ注入管配置とし、また注入面積は計算方法とは無関係であるので、 $4\text{ m} \times 6\text{ m} \times$  厚さ  $1\text{ m}$  の版を想定して、Fig.11 のように左端の第1列から第5列まで1列ずつ注入していく場合について計算を行った。

注入条件は case 7 として Table 3 のように設定した。

計算式は、注入条件が繰り返し変化するので式(17), (18), (19)を反復使用し、 $x$  方向を 24 等分、 $y$  方向を 16 等分した 425 点について  $h$  を求めた。ただし、実際の計算では、注入管の配置が AA に対して対称であり、注入速度も一定であることを利用して、幅  $B$ 、および中心線 AA 上にある注入管の注入速度を  $1/2$  とすることによって、計算時間は約  $1/2$  に短縮された。なお、 $x$ ,

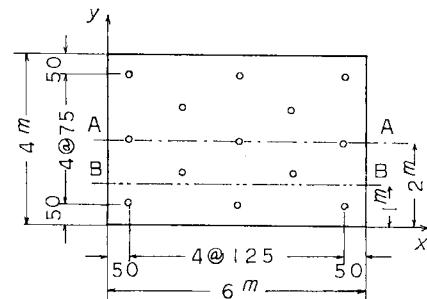


Fig. 11 Arrangement of the grouting pipes.

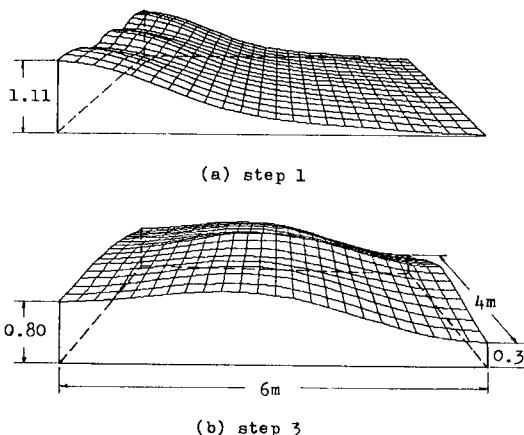


Fig. 12 Perspective drawings of mortar surface for case No. 7 when step 1 (a) and step 3 (b) were finished.

$y$  方向の分割数は、注入条件が変化しない場合には計算結果に影響しないが、注入条件が変化する場合には、分

Table 3 Grouting conditions of case No. 7.

Step	Pipe No.1			Pipe No.2			Grouting time(min)	V (%)	k(cm/s)
	x <sub>p</sub> (m)	y <sub>p</sub> (m)	Q(l/min)	x <sub>p</sub> (m)	y <sub>p</sub> (m)	Q(l/min)			
1	0.50	0.50	30.0	0.50	2.00	15.0	40		
2	1.75	1.25	30.0	-	-	-	20		
3	3.00	0.50	30.0	3.00	2.00	15.0	15		
4	4.75	1.25	30.0	-	-	-	10		
5	5.50	0.50	30.0	5.50	2.00	15.0	5		

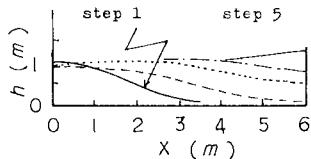
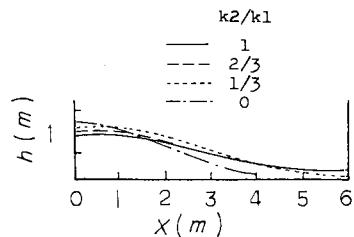


Fig. 13 Change of mortar surface at section B with the advance of grouting steps.

Fig. 14 Influence of  $k_2/k_1$  on the shape of mortar surface.

割数を少なくすると、数値積分の誤差が大きくなる。

Fig. 12(a)は、step 1が終了した時点におけるグラウトの注入状態であり、(b)はstep 3が終了した時点の状態である。

また、Fig. 13は各step終了時ごとのBB断面における表面形状を示したものである。

Table 3に示してある1~5 stepの各区間注入時間は、グラウト面がFig. 13のように、左端から順次約1mの高さになっていくように適当に選定したものであって、この結果から、片押し方式で一様な厚さに注入する場合には、stepの進行とともに区間注入時間は短くなる傾向があることがわかる。

なお、この例では注入終了までグラウトの流動性は変わらないとしているが、注入中断後、グラウトの流動性が低下する場合には、式(15)、(19)、(23)の既注入グラウトの流動を表わす項 $h_r$ に含まれる $k(k=k_1$ とする)を、再注入グラウトの流動を表わす項 $h_s$ または $h_g$ に含まれる $k(k=k_1$ とする)より小さくすればよい。

Fig. 14は、これらの比 $k_2/k_1$ を0~1に変化させたときのグラウト表面形状の相違をstep 2終了時におけるAA断面について示したもので、 $k_2$ が小さいほど既注入部分の時間経過による平坦化が少ないことは明らかである。

## 7. 結論

プレパックドコンクリートにおけるグラウト注入状況の予測方法を研究し、以下のような結論が得られた。

(1) 粗骨材の空隙中に注入されたグラウトの流動に、Darcyの法則を適用して理論的に求めたグラウトの填充状況は、実験結果とよく一致した。この理論式は、Green関数によって一般式の形で表現され、境界条件と初期条件が与えられれば容易に数値計算を行うことができる。その際の計算式は、型枠の形状と寸法、粗骨材の空隙特性とグラウトの流動性とによって定まる浸透係数、粗骨材の空隙率、注入管の本数と位置、注入速度、注入時間など、重要な注入条件のほとんどすべてを含み、水中注入の場合でも空气中注入の場合と全く同一である。

また、施工中に注入の中止、再注入、注入管の差し替え、注入速度の変更など、施工条件が繰り返し変化する場合にも適用できるばかりでなく、すでに注入したグラウトの流動性が減少する場合にも対応させることができる。

したがって、本研究結果を利用すれば、工事に先立つて良好な注入結果が得られる範囲で最も能率的な施工計画を綿密に立案しておき、グラウトの注入状況の検査結果を注入予測図と照合しながら、最適な施工条件を保持することが可能になるものと考えられる。

(2) Fig. 1の装置によって測定した浸透係数は、グラウトが水中で流動する場合の浸透係数とは厳密には一致しない。しかし、この測定値を用いた計算結果は注入の初期を除いて実験値とよく一致した。したがって、水中注入の場合でも同装置で浸透係数を測定してよいと思われるが、粗骨材の粒径が大きい場合や、グラウトの流動性が小さい場合に対しては、今後、装置の寸法等について改良を加える必要がある。

謝辞：序論においても述べたように、本研究の契機は、港湾技術研究所における研究と鉄道建設公団における実験であり、また、それらの実験結果によって理論の検証を行うこともできた。ここに記して関係各位に深甚なる感謝の意を表す次第である。

最後に、本研究の実験を担当した坂本信義助教授、ならびに昭和58年度卒論生諸氏に御礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) 木庭宏美・有吉保憲：プレパックドコンクリート工法における粗骨材空隙中のモルタルの流動と粗骨材の粒径について，運輸省技術研究所報告，Vol. 11，No. 5，pp. 15～26，1961.
- 2) 赤塚雄三：港湾工事におけるプレパックドコンクリートの施工管理に関する基礎研究，港湾技術研究所報告，Vol. 4，No. 6，1965.
- 3) 日本鉄道建設公団大阪支社：本四連絡調査 プレパックドコンクリート実験その2 報告書概要，1967.
- 4) 日本鉄道建設公団大阪支社：本州四国連絡橋基礎工調査実験，1968.
- 5) 田中・野口・桜井：大寸法碎石を用いたプレパックドコンクリートの大型実験体による注入実験，コンクリートジャーナル，Vol. 9，No. 7，pp. 12～24，1971.
- 6) 武川恵之助：プレパックドコンクリートの施工法に関する研究(学位論文)，1975.
- 7) 岩崎訓明：プレパックドコンクリート(最新コンクリート技術選書7)，山海堂，1981.
- 8) 長瀧・米倉：回転粘度計によるモルタルの流动性解析の1考察，セメント技術年報29，pp. 207～212，1975.など
- 9) 甲藤好郎：熱伝導論，共立出版，1956.
- 10) 西田俊策，ほか4名：鹿島港ドライドックの施工法に関する調査研究，港湾技術研究所報告，Vol. 6，No. 1，1967.

(1984.5.18・受付)